

電動機的全デジタル速度制御

Microprocessor - Based Fully Digital Control for Motor Drives

マイクロプロセッサを中心としたマイクロエレクトロニクスデバイスの進歩と普及により、パワーエレクトロニクス駆動電動機的全デジタル制御が技術的にも経済的にも可能となり、アナログ制御では到底実現不可能な性能、機能、信頼性、保守性などの高度化が可能となった。特に、高速で、安価な16ビットマイクロプロセッサや周辺LSIの普及は、電動機制御の全デジタル化をより決定的なものとし、実用化が急速に拡大している。日立製作所は既に製品化技術を確立し、鉄鋼用を中心として多数の納入実績をもっている。

本論文では、高精度化、高応答化などの制御アルゴリズムと故障診断を中心とした高信頼化策など、マイクロプロセッサ適用による電動機的全デジタル速度制御の特徴的技術について述べる。

梓沢 昇* Noboru Azusawa
高橋潤一* Jun'ichi Takahashi
清水五雄* Itsuo Shimizu
大前 力** Tsutomu Ômae

1 緒 言

マイクロプロセッサが出現してから、わずか10年余りではあるが、この間でのマイクロエレクトロニクスデバイス技術の進歩は著しく、高速で高機能な演算処理能力をもつマイクロプロセッサ及び高集積化されたメモリ、周辺LSIが安価に利用できるようになってきている。このため、製品の品質や歩留まりの向上、及び運転の自動化の観点からほとんどの産業分野でマイクロプロセッサを用いたデジタル化製品が開発され、実用に供されている。

電動機制御へのマイクロプロセッサ適用も、その例外ではなく、マイクロプロセッサの出現以後、多くの研究者がその応用技術の研究、開発を進めているが、実用化の観点からは、他の応用分野に比べて遅れていた¹⁾。この主な原因は、マイクロプロセッサ適用のデジタル制御がリニアIC適用のアナログ制御に比べ、特に経済性、応答性の点で対抗できなかったことにある。しかし、8086、Z8000、68000などに代表される第3世代のマイクロプロセッサの出現により、マイクロプロセッサ適用のデジタル制御は、経済性、応答性の点でも十分対抗できる段階に入り、急速に実用化が進展しつつある。

以下、ここでは電動機的全デジタル速度制御について、全デジタル化の背景と課題、全デジタル制御システムの概要、デジタル制御の制御アルゴリズム、デジタル化で可能となる故障診断などを中心に述べる。

2 背景と課題

2.1 背 景

電動機の可変速制御システムには、サイリスタを中心としたパワーエレクトロニクス素子、トランジスタ、ICを中心としたエレクトロニクス素子を利用して、図1に示す多重制御ループ構成が用いられている。指令や負荷変動時の過渡応答、軽負荷時でのサイリスタ変換装置の非線形特性から生ずる安定性、応答性の劣化を改善するため、速度制御ループのほかに電流制御ループや電流変化率制御ループなどの高速マイナーループが用いられている。これら速度制御ループ、高速マイナーループにはリニアICを適用したアナログ制御方式が採用されている。

ところで、製鉄業や製紙業などのプラントで、製品の品質や歩留まりの向上、及び運転の自動化の観点から、計算機を用いたDDC(Direct Digital Control)化が進み、図2に示すようにAPC(Automatic Loop Position Control)、AGC(Automatic Gauge Control)、主幹制御などの制御自体だけでなく、操作信号レベルまでデジタル化されている。一方、パワー制御レベルである電動機速度制御装置でも、マイクロプロセッサを中心としたマイクロエレクトロニクス技術の進歩とあいまって、プラント全体の総合デジタル化を構成する上で全デジタル化が要請され、かつ(1)速度制御系の高精度・高性能化、(2)高信頼性化、(3)故障診断機能の充実による保守性の向上などの要請がある。これらの強い要請、及び表1²⁾に示すようにデジタル制御方式が精度、保護、保守性などの点で優れているにもかかわらず速度制御装置のデジタル化が遅れた主な理由は、応答性及び経済性の点でアナログ制御方式に匹敵できなかったことにある。しかし、第3世代のマイクロプロセッサ及び周辺LSIに代表されるマイ

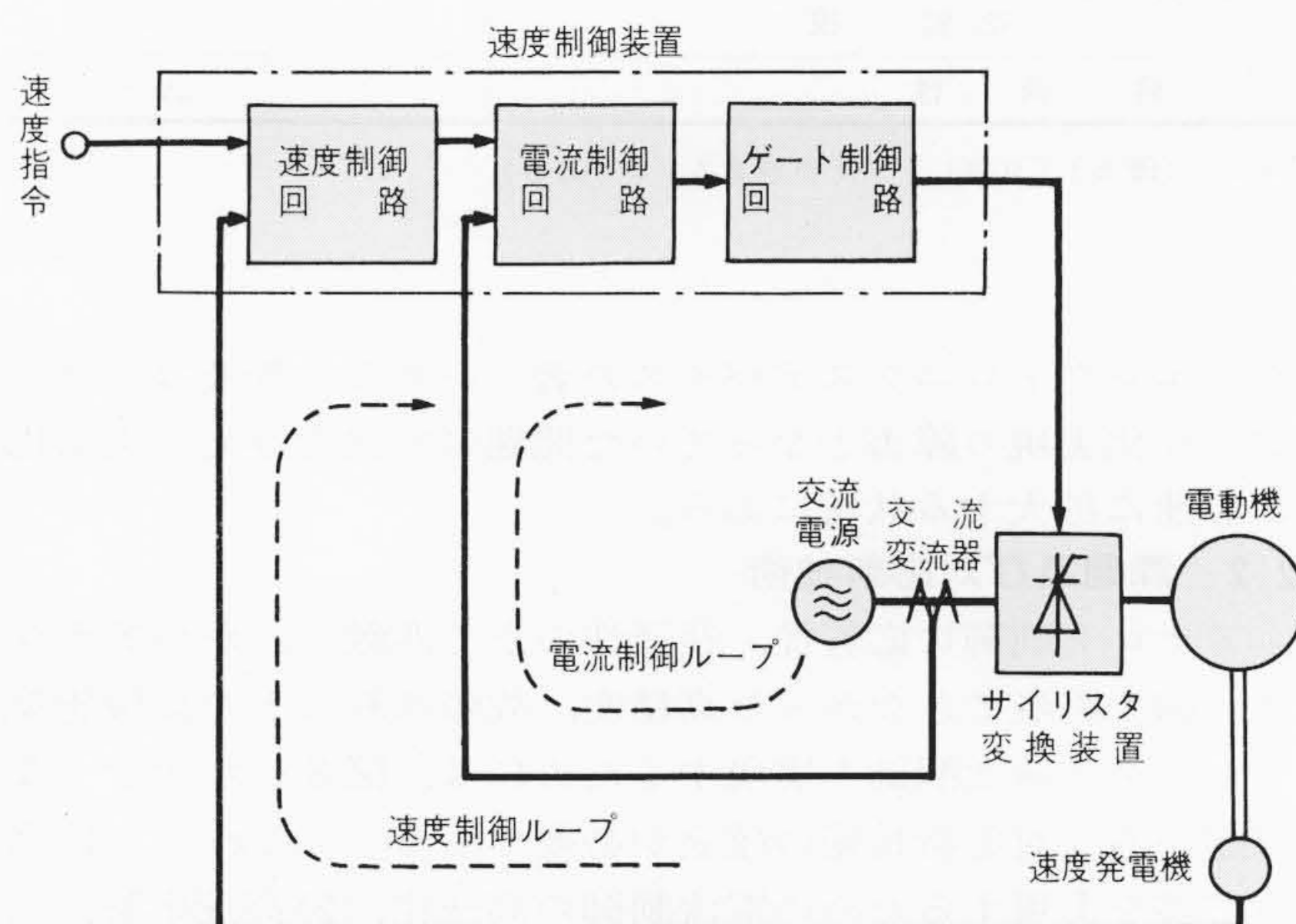
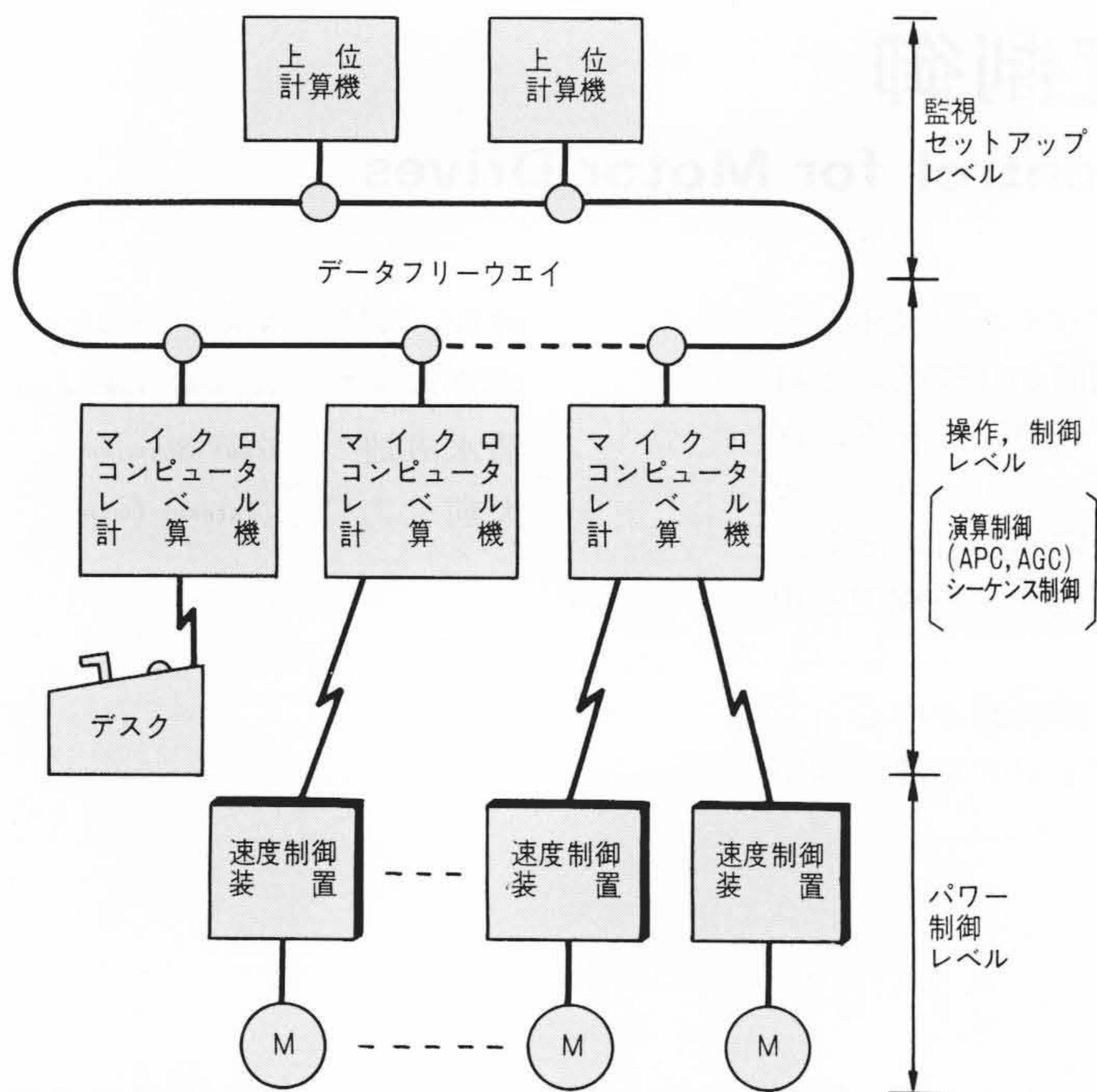


図1 電動機速度制御システム 従来のサイリスタ駆動電動機速度制御システムブロック図を示す。

* 日立製作所大みか工場 ** 日立製作所日立研究所



注：略語説明
APC(Automatic Looper Position Control)
AGC(Automatic Gauge Control)

図2 圧延プラントシステム構成例 圧延プラントでのDDC(Direct Digital Control)分散化システムの構成例を示す。

表1 アナログ制御とデジタル制御の特徴比較 アナログ制御とデジタル制御の主な特徴比較を示す。

項目		方式	アナログ 制御	ディジタル 制御
精 度	改善に対する容易性		△	◎
	ドリフト に対する 影響	温度、電圧変化	×	◎
		経年変化	×	◎
応 答 性			○	△→○
保 護 機 能			△	○
拡 張 性	(1) 機 能		△	○
	(2) 設備の自動化		△	○
保 守 性	(1) 故障診断		×	◎
	(2) 監 視		△	◎
経 済 性			○	△→○

注：◎(優る) ○(良い) △(やや劣る) ×(劣る)

クロエレクトロニクスデバイスの著しい進歩と普及は、デジタル化実現の障害となっていた問題に解決を与え、実用化が急速に拡大する状況にある。

2.2 課題及び対応新技術

アナログ制御に応答性，経済性の点で匹敵し，かつアナログ制御で実現できなかった高精度，故障診断などの高機能なデジタル速度制御を実現するためには，**図 3**に示すような課題があり対応新技術の確立が必要である。すなわち，(1)高速応答を実現するための電流制御の高速化，(2)高速応答，高精度及び広い可変速範囲を実現するための速度検出の高速・高精度化，(3)保守性向上のための故障診断の充実，(4)コストパフォーマンス向上のためのマイクロプロセッサの負荷率軽減によるシングルプロセッサ化などの課題がある。

これら課題は第3世代のマイクロプロセッサ及び周辺LSI

の進歩と普及により、デジタル制御の得意とした適応制御、サンプリング制御を用いた、(1)新電流制御方式、(2)新デジタル速度検出方式、(3)故障診断アルゴリズムなどの制御アルゴリズムの確立で解決が可能となってきた。

③ 全デジタル制御システム

図4に、第3世代のマイクロプロセッサを中枢とした全デジタル速度制御システムの構成例を示す。主回路は電動機の種類によって異なり、直流電動機の場合は逆並列接続の二組みの三相全波サイリスタ変換装置から成り、交流電動機の場合は順変換器と逆変換器、あるいはサイクロコンバータなどの周波数変換装置から構成される。検出器は電流検出用として交流変流器を、交流電動機制御の場合必要となる周波数変換装置の出力電圧検出用として交流変成器を、速度検出用

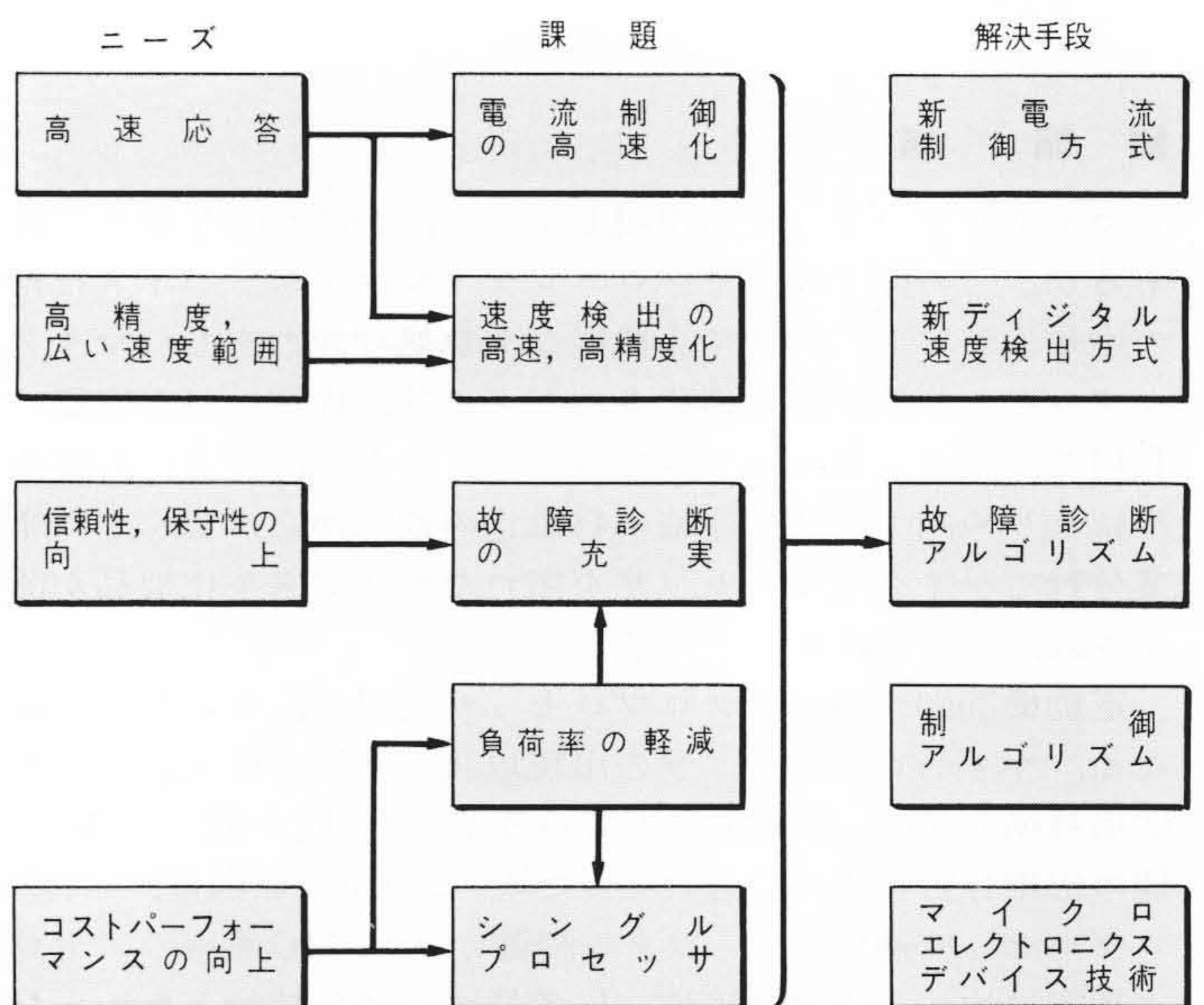


図3 技術的課題 デジタル速度制御に対するニーズと解決するための課題、及び解決手段を示す。

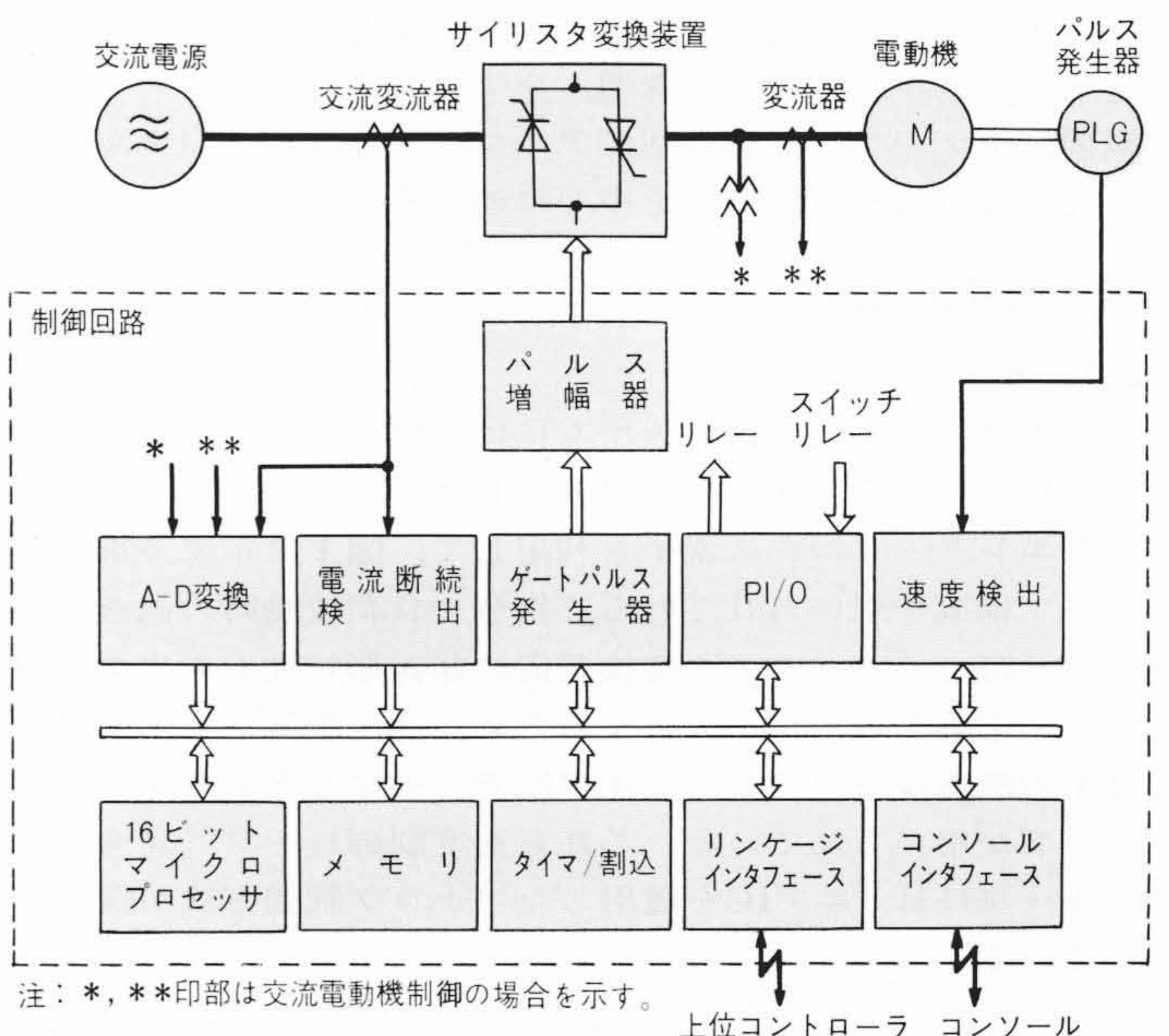


図4 デジタル速度制御システムの構成 第3世代のマイクロプロセッサを用いた全デジタル速度制御システムの概要を示す。

として回転数に応じた周波数のパルス列信号を発生するパルス発生器を用いている。制御回路は点線内で示す機能ブロックで構成され、(1)速度制御、電流制御、保護制御、故障診断、シーケンス制御などの演算処理を行なう機能、(2)上位コントローラ、コンソールと運転指令、速度制御装置の状態などのデータを送受するインタフェース機能、(3)速度、電流、電圧などの状態量を検出する検出機能及び(4)サイリスタ変換器のゲート信号を作成する機能をもっている。図5に全デジタルサイリスタレオナード制御装置の外観を示す。

4 制御アルゴリズム

デジタル制御方式で解決しなければならない課題である電流制御の高速化、高度検出の高速高精度化及びマイクロプロセッサの負荷率の軽減を解決するためポイントとなる制御アルゴリズムについて、サイリスタレオナードの例によって以下に述べる。

4.1 新電流制御方式

サイリスタや電動機などの電流定格内で応答の良い速度制御を行なうため、速度制御ループの内側に電流制御ループが必要となる。更に、直流電動機の場合、整流子の整流限界から電流の変化率を制限するため、また電流断続状態でのサイリスタ変換器の非線形特性によって生じる電流制御ループの応答低下を防止するため、電流制御ループの内側に電流変化率制御ループが必要となる。電流変化率制御をフィードバック制御で実現するためには、電流の変化をサイリスタの点弧周期(50Hzの6相制御の場合、平均3.3ms)よりも高速なサンプリング周期で検出しなければならない。そのため、マイクロプロセッサの負荷率が高くなりシングルプロセッサでの実現が困難となる。そこで、電流変化率の検出を含めた新しい電流制御方式を開発した。

本方式は、サイリスタ変換器で制御される電流の変化がサイリスタの点弧時点での電流値の変化に対応する点を利用した方式で、図6に示すように、点弧パルスに同期して電流制御、電流変化率制御の演算処理を行なう。すなわち、点弧パルスの発生ごとにマイクロプロセッサに割り込みをかけて、その点弧時点での電流の瞬時値及び平均値を検出し、マイクロプロセッサによって変化率を演算するとともに、電流制御演算及び電流変化率演算を行なう。図7に、この電流制御方式

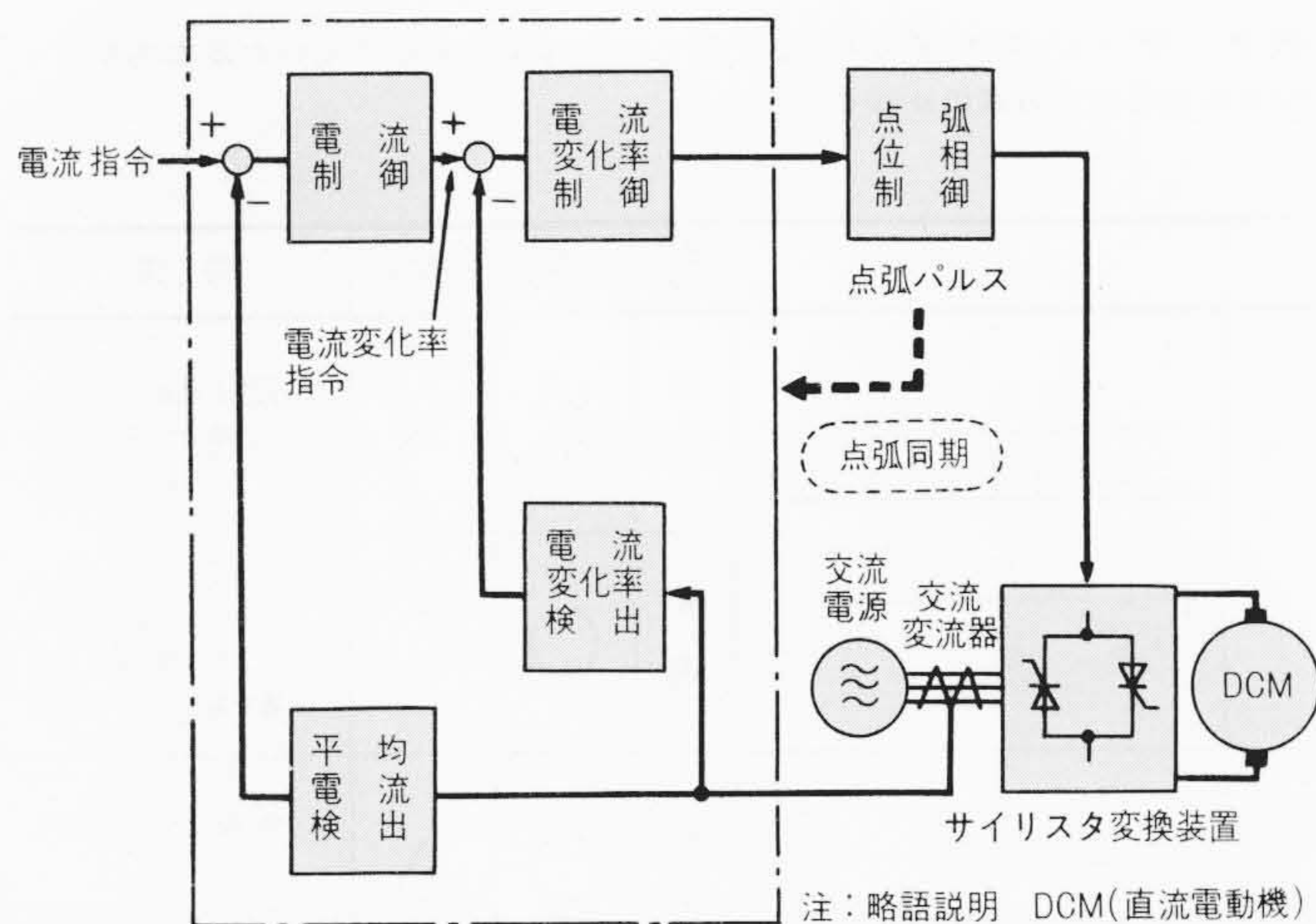


図6 新電流制御方式のブロック図 マイクロプロセッサの負荷率を低減し、高速応答を実現する新しい電流制御方式のブロック図を示す。

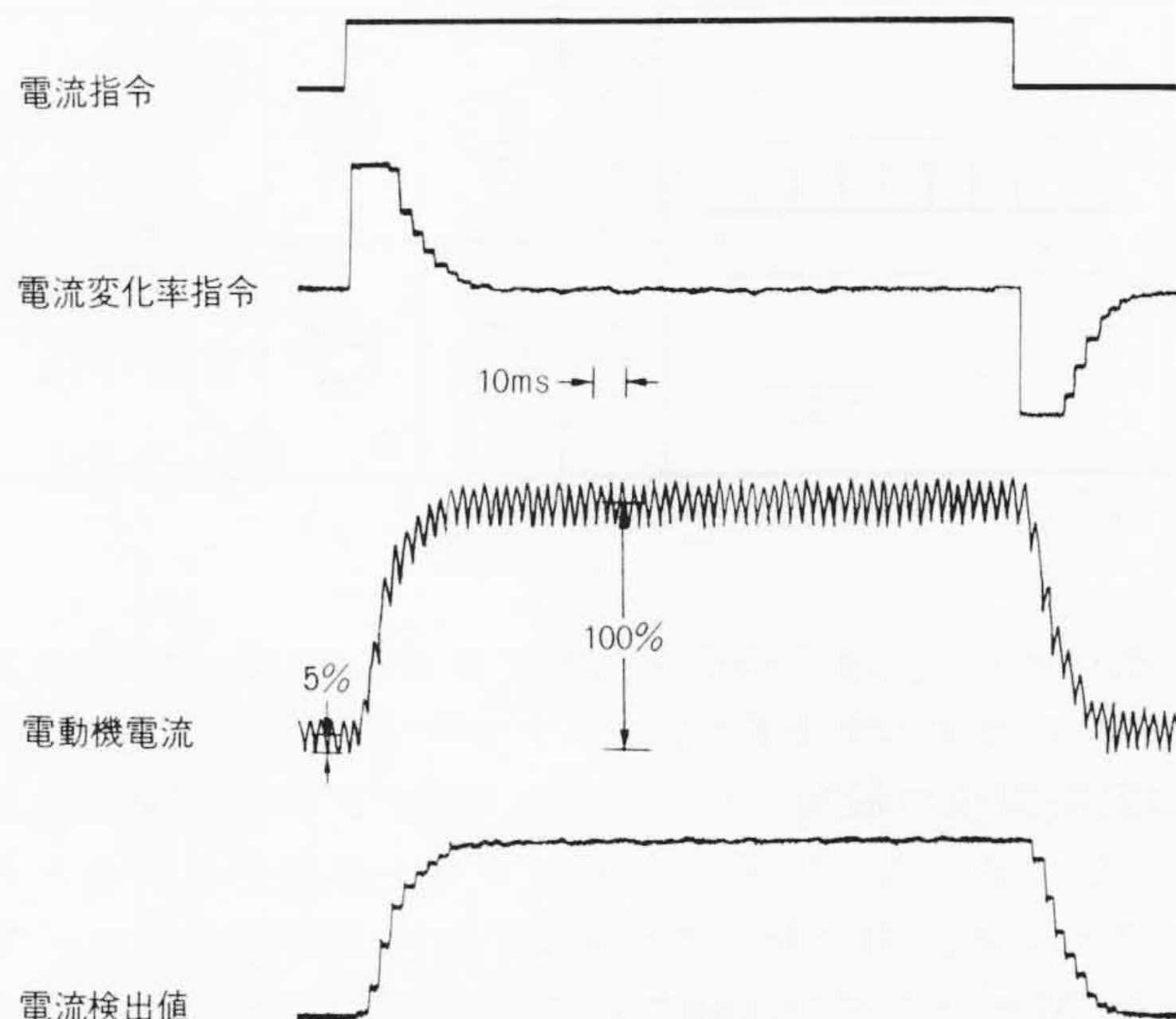


図7 電流ステップ応答波形例 電流断続-電流連続時での新電流制御方式を用いた電流ステップ応答オシログラムを示す。

の電流断続→電流連続時、電流ステップ応答オシログラムを示す。同図に示すようにサンプリング周期を高速にしないで、電流変化率を制御し、電流断続・連続の状態変化によるサイリスタ変換器の特性変化を十分補償することができる³⁾。

4.2 新デジタル速度検出方式

速度制御装置では、速度検出処理法が速度制御精度、可変速範囲及び応答を決定する重要なポイントである。アナログ制御方式で用いている速度発電機とA-D変換器による速度検出は、速度発電機のリップル及び直線性から精度、応答とも得られない。パルス発生器による速度検出方式は、通常、(a)入力パルス数を測定するN方式、あるいは(b)入力パルスの周期を測定するT方式が用いられるが、表2に示すように、両者とも低速時の精度が悪い、高速時の精度が悪いなどの問題がある¹⁾。そこで、N方式とT方式の利点を最大限に活用した新しい速度検出方式、すなわちN/T方式を開発した。

本方式は、入力パルスに同期して検出を開始し、一定時間 T_c 後の最初の入力パルスに同期した時点で検出を終了することを特徴とし、検出時間 $T_c + \Delta T_3$ のパルス数 m_1 を検出するのである⁴⁾。図8(a)に本方式のブロック構成図を、同図(b)にそ

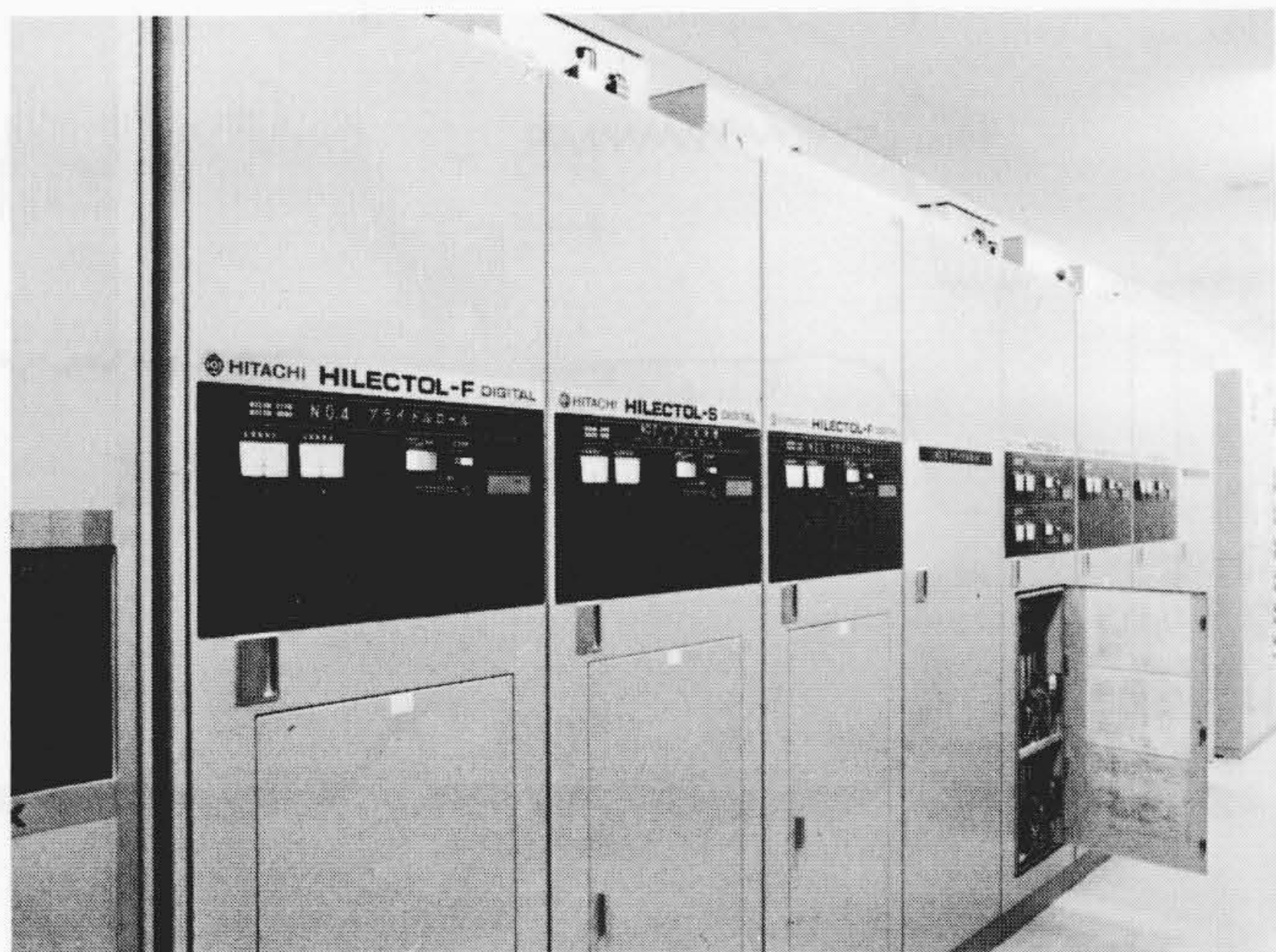


図5 全デジタルサイリスタレオナード制御装置の外観 補機用全デジタルサイリスタレオナード制御装置(D-HILECTOL)の列盤外観を示す。

表2 デジタル速度検出方式 パルス発生器を用いた基本的なデジタル速度検出方式の比較を示す。

方 式	方 式	運転速度	分解能	精度	特 徴
N方式		低速	×	×	(1) 回路が簡単である。 (2) 低速時入力パルス数が少なく、精度が極端に悪くなる。 (3) 高速でも測定タイミングと入力パルスのずれにより、精度向上が困難である。
		高速	○	○	
T方式		低速	○	△	(1) 低速時の分解能を得られる。 (2) 回転むら、スロット誤差により精度向上が困難である。 (3) 高速時検出周期が小さくなり、精度が極端に悪くなる。
		高速	×	×	
N/T方式		低速	◎	◎	(1) 回転むら、スロット誤差を平均化し、誤差を1/m1以下に低減できる。 (2) 高速、低速とも高応答で高精度な測定ができる。 (3) 演算を要する。
		高速	◎	◎	

注：◎（優る。）○（良い。）△（やや劣る。）×（劣る。）

の原理図を示す。速度検出を必要するときには、マイクロプロセッサからまず起動FF（フリップフロップ）がプリセットされ、 ΔT_1 時間後の最初のパルスから起動FFが検出開始状態にセットされる。この信号により T_c タイマが起動されるとともに T_c タイマの出力を介して停止FFが停止解除となり、Tカウンタ、Mカウンタが起動される。検出開始後一定時間 T_c 経過すると T_c タイマから停止FFがプリセットされ、 ΔT_3 時間後の入力パルスにより検出終了状態にセットされる。この信号により、Tカウンタ、Mカウンタが停止するとともに、両者の計測値をマイクロプロセッサが取り出し、検出速度を演算する。このような検出方式とすることによって、N方式、T方式の精度を悪くする要因であるパルス発生器のスロット誤差、及び測定時間と入力パルスの位相差による誤差の影響を大幅に減少することができる。図9に本方式での速度ステップ応答オシログラムを示す。同図(a)、(b)に示すように低速、高速のいずれでも短時間で精度よく検出できる。

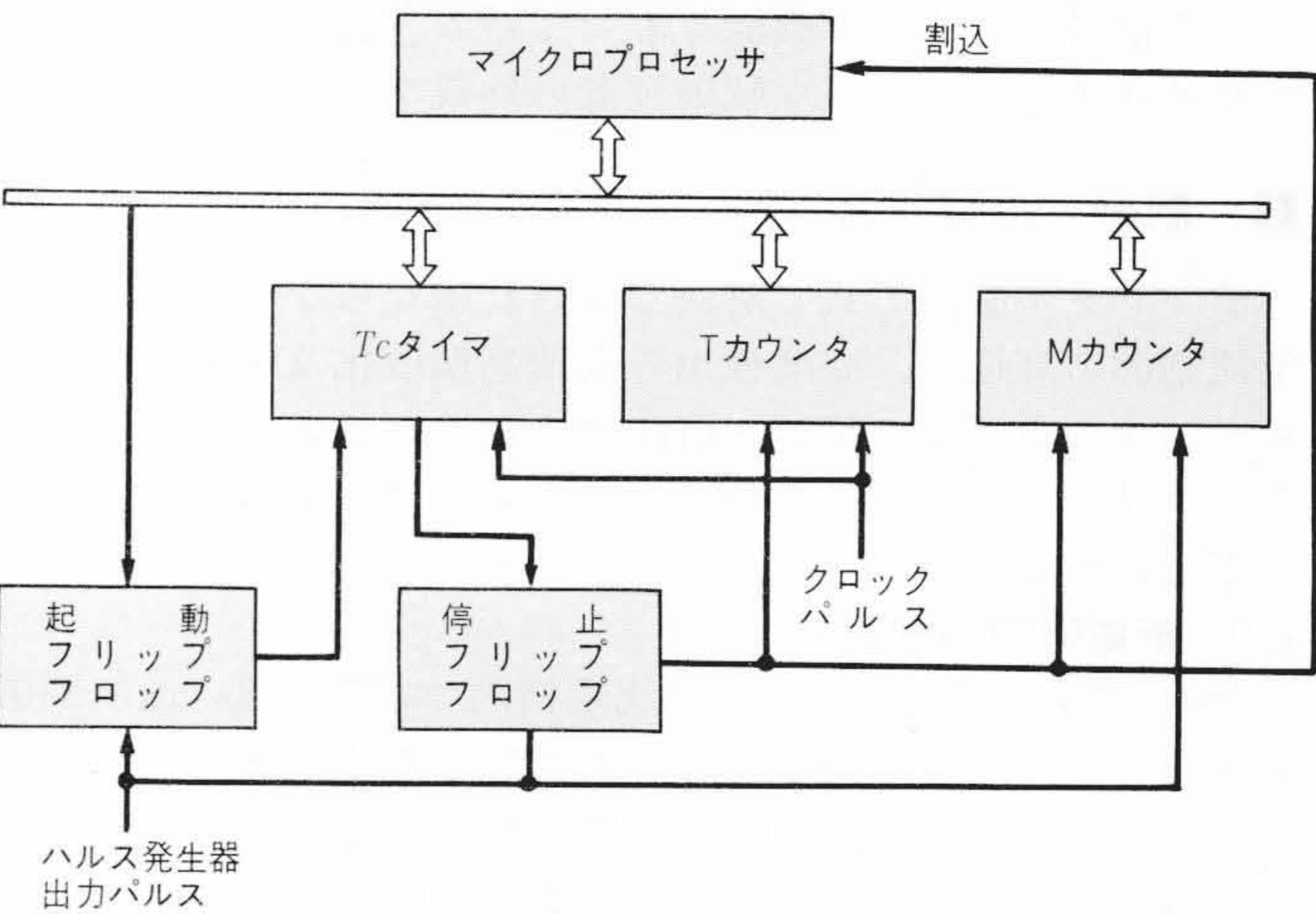
5 信頼性・保守性向上策

信頼性・保守性を向上するため、デジタル制御方式では構成部品のLSI化による部品点数の大幅削減と、故障診断機能の充実による故障の早期診断、故障箇所のローカライズを行なっている。以下、アナログ制御方式では実現できなかった故障診断アルゴリズムについて述べる。

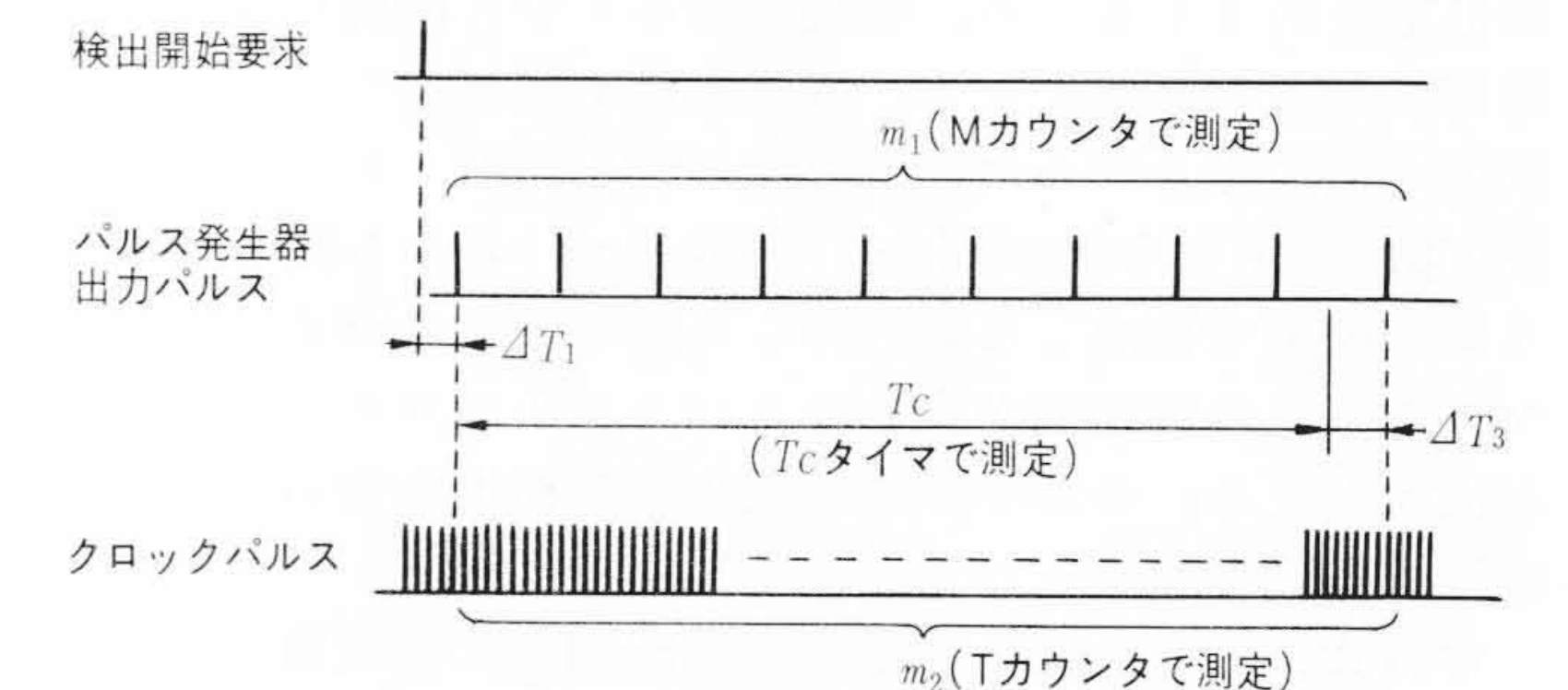
速度制御装置の運転状態を、(1) 起動前のスタンバイ状態、(2) 起動後の運転中状態、(3) 異常発生後の故障状態に分類し、それぞれの運転状態に対応した診断を行なう図10に示すような故障診断方式を用いた。すなわち、(1) に対しては構成ハードウェアの機能が正常に動作することを診断する起動前診断を行ない、(2) に対しては検出値、演算結果の制御量が運転状態に照らして正常であるかどうかを診断する定常時診断と制

御データ、検出値などの蓄積を行ない、(3) に対しては蓄積された制御データ、検出値、及び故障モードデータから故障原因を診断する異常時診断を行なっている。

起動前診断及び定常時診断の主な内容を図11に示す。起動前診断ではモデル照合法を、定常時診断では変化幅チェック、



(a) 構成



(b) 原理図

図8 新デジタル速度検出方式 新デジタル速度検出方式であるN/T方式の構成及び原理図を示す。

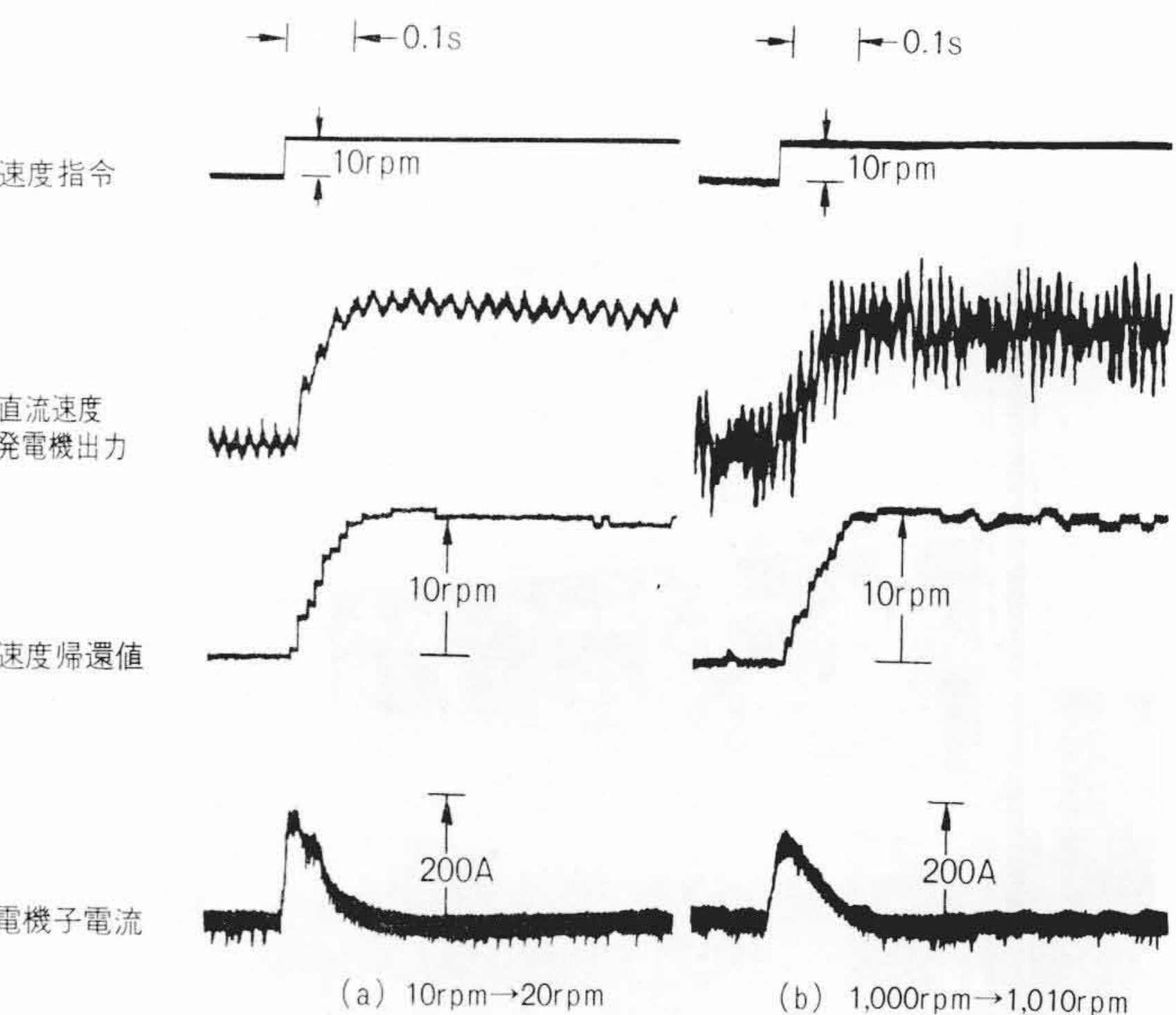


図9 速度ステップ応答波形例 新デジタル速度検出方式を用いた速度ステップ応答のオシログラムを示す。(a)は10rpmから20rpm、(b)は1,000rpmから1,010rpmへの応答を示す。

合理性チェック、PLG(パルス発生器)欠相・断線チェックなどに、クロス照合法及び合理性照合法を用いている。図12に故障時診断の故障トレースバック例を示す。同図は、瞬時過電流及び速度異常が発生した場合の故障発生に至るまでの各種制御量の変化を示すデータである。

6 特徴と適用効果

以上、述べてきた新技術を用いた全デジタル速度制御装置の主な特徴、及び適用効果例について以下に紹介する⁵⁾。

(1) 高精度な速度制御が可能である。

(a) 定格速度時±0.025%以上と従来に比べ10倍以上の精度向上が可能である。

(b) 1%速度時±1%以上と従来に比べ50倍以上の精度向上が可能である。

これらの結果、可変速範囲を1:100以上と向上するとともに揃速性を大幅に向上できる。

(2) 信頼性・保守性の向上

(a) 全デジタル化により、従来、1週間あるいは10日ごとに行っていたドリフト調整が不要になる。

(b) LSI化による部品点数の削減により、従来に比べ2倍

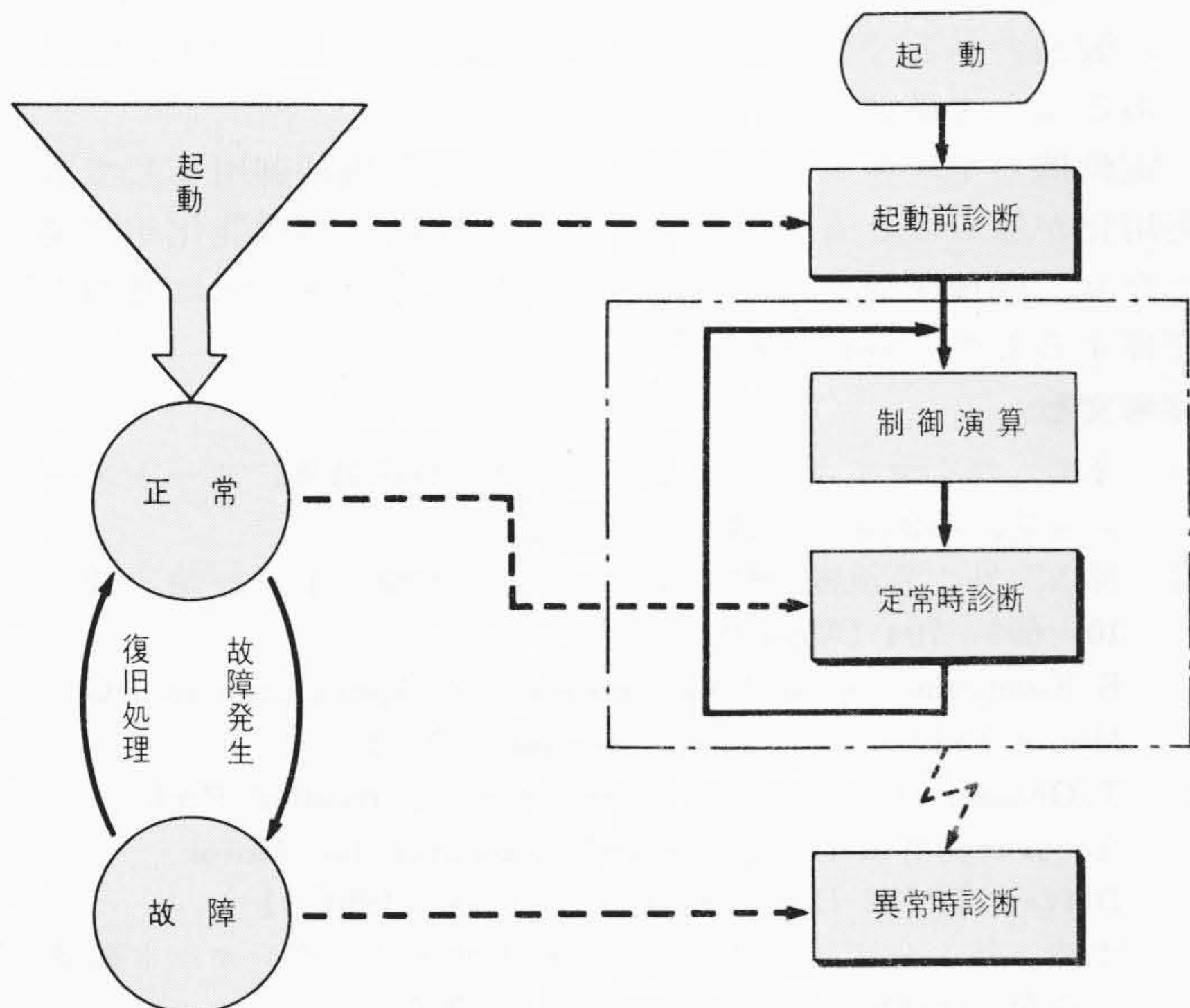
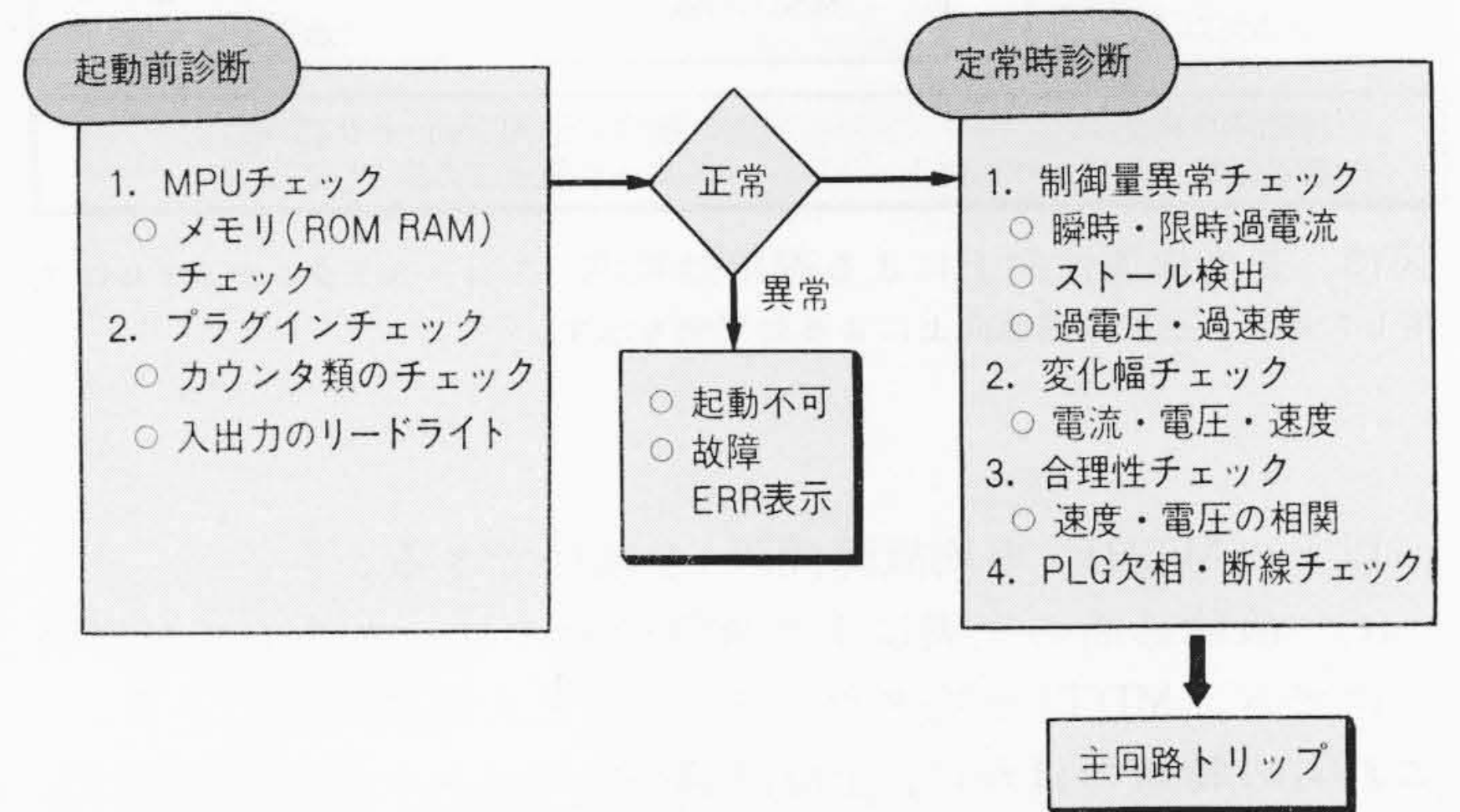


図10 故障診断方式 運転状態と各運転状態で行なっている故障診断を示す。



注：略語説明 MPU(Microprocessor), ROM(Read Only Memory) RAM(Random Access Memory), ERR(Error)

図11 故障診断 起動前診断及び定常時診断での故障診断の主な内容を示す。

FULT MODE		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
		0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0
TRACE DATA		NO	REF	FG	IRE	IFG	GPG	CNV	INV	VFG	CNT						
点弧周期 (約3ms)ごとのデータ		1	50	50	7	7	22	1	0	43	0417						
		2	50	50	7	7	22	1	0	43	0418						
		3	50	50	7	7	22	1	0	42	0419						
		4	50	50	7	7	22	1	0	42	0420						
		5	50	50	7	7	22	1	0	42	0421						
速度指令の ステップ変化		6	50	50	7	7	22	1	0	43	0422						
		7	50	50	7	7	22	1	0	43	0423						
		8	50	50	7	7	22	1	0	43	0424						
		9	50	50	6	7	22	1	0	43	0425						
		10	50	50	6	7	22	1	0	43	0426						
過電流出		11	50	50	6	7	22	1	0	43	0427						
		12	105	50	100	7	33	1	0	43	0428						
		13	105	50	100	7	43	1	0	43	0429						
		14	105	50	100	9	51	1	0	43	0430						
		15	105	50	100	16	55	1	0	43	0431						
速度異常検		16	105	50	100	29	54	1	0	43	0432						
		17	105	50	100	48	49	1	0	43	0433						
		18	105	50	100	67	- 87	1	0	45	0434						

故障モード
 1: 外部故障
 2: 過電流
 3: 過電圧
 4: 過速度
 5: 過負荷
 6: ストール時の過負荷
 7: 電源喪失
 8: 逆並列短絡
 9: PLG欠相
 10: PLG断線
 11: 速度異常
 12: 未使用
 13: di/dt異常
 14: dV/dt異常
 15: dn/dt異常
 16: 瞬時停電

注：略語説明 GPG(Gate Pulse Generator)

図12 故障トレースバック例 異常発生させたときの故障トレースバックデータの例を示す。

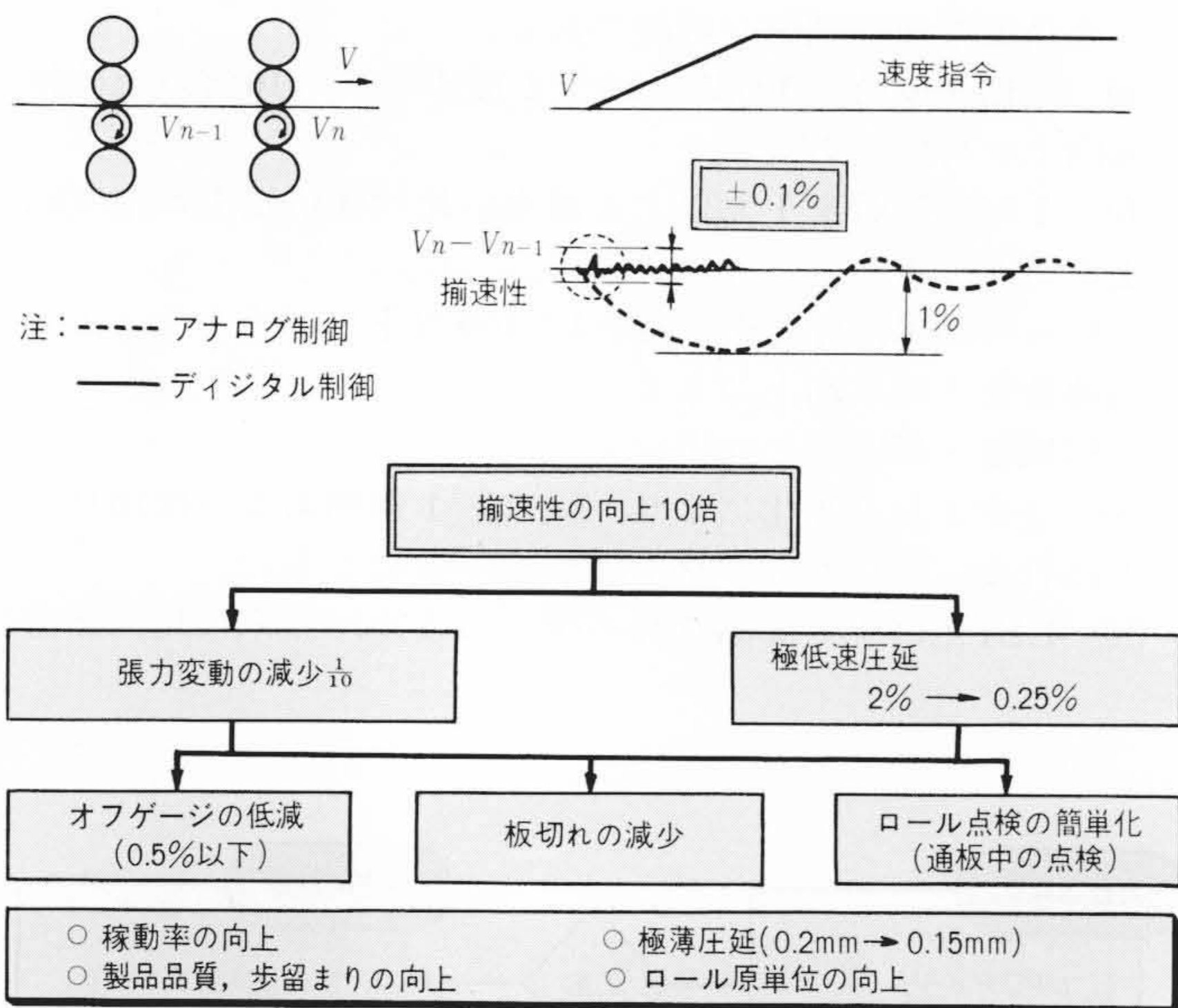


図13 速度揃速性向上による適用効果例 コールドタンデムミルに適用した場合の速度揃速性向上による効果例を示す。

以上のMTBF(平均故障間隔)を確保できる。

(c) 故障診断の充実により故障箇所のローカライズが容易にでき、MDT(平均ダウンタイム)を大幅に向上できる。これらの特徴のほかに、上位計算機とのリンケージの簡素化、プラント全体のデジタル化なども可能になる。特徴の一つである速度揃速性向上によるコールドタンデムミル適用の効果例を図13に示す。同図に示すように、全デジタル化によ

りオフゲージの低減、板切れの減少、ロール点検の簡単化などができ、稼働率の大幅な向上が可能である。

7 結 言

新しい電流制御方式や速度検出方式などを用いて、応答性、経済性の面でもアナログ制御に匹敵し、アナログ制御では実現不可能な高精度で故障診断の充実した全デジタル速度制御を実現した。その結果、全デジタルサイリスタレオナード制御装置としてコールドタンデムミル、ホットタンデムミル、プロセッシングラインなどの製鉄プラントに昭和56年10月に1号機を適用して以来、現在までに200セット以上適用し、製品の品質や歩留まり向上など稼働率の大幅向上に効果があることを確認した。

電動機的全デジタル制御は、交流電動機制御用としても実用化が進むとともに、いっそう高性能化、高機能化が容易となり、今後予想される圧延及び処理工程の連続化に威力を発揮するものと期待される。

参考文献

- 1) 深尾, 外: マイコンによるモータ制御技術特集, オートメーション, 第26巻, 第14号(昭56-12)
- 2) 神山, 外: 直流電動機的全デジタル制御, 日立評論, 61, 10, 699~704(昭54-10)
- 3) K. Kamiyama, et al.: Microprocessor Application in DC Motor Drives, US-Japan Seminar (1981)
- 4) T. Ohmae, et al.: A Microprocessor-Controlled High-Accuracy Wide-Range Speed Regulator for Motor Drives; IEEE IECI '81 Proceedings (1981-11)
- 5) 土井, 外: 全デジタル化圧延機用サイリスタレオナード装置の開発, OHM, 69, 3, 20~22, (昭57-3)

論文抄録

コイル絶縁層の特性に及ぼす集成マイカの効果

日立製作所 門谷建蔵・安芸文武・松延謙次
電気学会論文誌 102-A, 588~594(昭57-11)

大形回転電機の高圧固定子コイル絶縁は、エポキシ集成マイカプリプレグ絶縁が主流である。これは薄片状のマイカ粒子を抄造した集成マイカシートに、補強のため薄いガラスクロスを裏打ちして、エポキシ樹脂を塗布含浸し半硬化状態にした、いわゆるプリプレグのテープを、コイル導体の周囲に巻回して、加熱プレス成形する方式である。著者らはさきに、機械的・電気的な耐久性の優れた新しい集成マイカプリプレグ絶縁を開発し、「スーパーハイモールド」絶縁と名付けて発表した。この論文は、その開発過程での理論的な背景を示すものである。

マイカ絶縁の特徴は、マイカ粒子が薄片状をしているために異方性の絶縁層を形成でき、貫層方向には優れた耐電界性をもたせ、沿層方向には優れた耐機械応力性をもたせられる点にある。このような特長を十分に発揮させるには、マトリックスであるレジンに強化材となるマイカ粒子を、いかに効果的に複合するかという、複合設計思想(ここではフレック強化プラスチックの理

論)の導入が不可欠である。この論文では、最終的なエポキシ集成マイカプリプレグテープの構成、すなわち集成マイカシート、裏打ちガラスクロス及び含浸レジンの、それぞれの内容と比率を決めるのに、複合設計的な考え方を導入している。

まず、マイカ粒子の直径(更に理論的には平均アスペクト比、すなわち平均直径と平均厚さの比)が約2.5倍異なる、2種類の集成マイカシートとエポキシ樹脂とで、それぞれマイカの含有率(wt%)を6通りに変えた積層板を作り、機械的強度(曲げ強さ、弾性率、破壊ひずみ及び層間剪断強さ)を評価した。2種類の集成マイカシートの一方(Sマイカ)は従来のプリプレグ絶縁に採用していたもので、アスペクト比が約2.5倍の新集成マイカシート(Mマイカ)が新たに採用するものである。機械的強度は、フレック強化プラスチックの理論どおりに、アスペクト比の大きいほうが、またマイカ含有率が多くなるほど大きくなる。しかし、破壊ひずみだけはマイカ含有率が多くなるに

つれて低下する(すなわち、もろくなる。)傾向がある。そこで、破壊ひずみが従来例(Sマイカで含有率54%)より低下しない範囲で、強さと弾性率が最大になるように、新集成マイカの構成をMマイカで含有率66%に定めた。

プリプレグを加熱成形した絶縁層の状態では、マイカ含有率が約66%になるようにプリプレグテープを構成した。最終的にはこの新しいプリプレグテープで長さ1mのモデルバーコイルを作り、課電寿命特性及び応力疲労特性までの諸特性を評価した。これらの長期間耐久性でも、静的曲げ強度や短時間絶縁破壊強さの場合と同様に、新集成マイカ絶縁のほうが約23~33%優れている。個々の特性ごとに、アスペクト比、マイカ含有率、あるいはマイカとエポキシ界面の接着性の、いずれがより効果があるのかを考察している。